

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106872

五轴数控机床的误差实时补偿控制器^{*}

岳玉霞¹ 王秀山² 李利军³

(1. 安阳职业技术学院 安阳市中等职业技术学校 安阳 455000; 2. 河南农业大学 机电工程学院 郑州 450000;
3. 安阳职业技术学院 安阳 455000)

摘要: 针对开发的误差实时补偿控制器,通过利用温度传感器对双转台五轴机床温度场进行分析,并用位移传感器测量五轴机床的刀具相对于工作台在 x 、 y 、 z 方向上的热误差。利用开发的机床位移通讯接口系统建立补偿控制器与机床 CNC 系统通讯接口的连接,从而能够使机床的位移信号实时传入补偿控制器,在已经确立的敏感热源点安装补偿用温度传感器,并通过温度采集系统建立温度传感器与补偿控制器的连接,实现温度信号引入补偿控制器,能进行机床温度、主轴在 3 个方向上的热误差手动和自动测量,让测量数据和模型输出结果进行比较,预报模型的残差比较小,补偿效果较好。

关键词: 五轴机床;热误差;几何误差;补偿控制器

中图分类号: TG659 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Real time error compensation controller for five axis CNC machine tools

Yue Yuxia¹ Wang Xiushan² Li Lijun³

(1. Anyang Secondary Vocational and Technical School, Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China;
3. Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China)

Abstract: The development of Real time error compensation controller can detect and identify the temperature field of five axis machine tool with double turntable by using temperature sensor. It can also measure the thermal error of the tool in the directions of x 、 y and z relative to the worktable by the displacement sensor. The communication interface between compensation controller and CNC system of machine tool is established by using the developed communication interface system of machine tool displacement. So the displacement signal of the machine tool can be transmitted to the compensation controller in real time and the temperature sensor for compensation is installed at the established sensitive heat source point. The connection between temperature sensor and compensation controller is established by the temperature acquisition system. The temperature signal is introduced into the compensation controller, which can measure the temperature of machine tool and thermal error of spindle in three directions manually and automatically. Compared the measured data with the model output, the residual error of prediction model is small. The compensation effect is better.

Keywords: five axis machine tool; thermal error; geometric error; compensation system

0 引言

科技水平的迅猛发展要求制造业提供高精密的数控机床,现代数控技术正朝着高主轴转速和高的进给速度方向发展。然而,高速切削加工引起数控机床发热严重。研究表明,在总误差中热变形引起的误差所占比重不断增大,热变形误差成为加工精度提高的主要障碍。我们研制的基于外部坐标系偏移的五轴数控机床的误差实时补偿控制器在

上海第二机床厂等单位和自己的实验机床上进行了补偿实验,通过开发的接口卡装置能够实现几何、热误差的联合补偿,能进行机床温度、主轴在 3 个方向上的热误差手动和自动测量,补偿效果较好。

1 双转台五轴机床的温度场分析

热动态过程是指机床在主要热源的影响下,引起机床结构上的热变形。双转台五轴机床有 5 个联动运动副,高

收稿日期:2021-06-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(U1204524)、河南省基础与前沿技术研究计划(132300410356)项目资助

速切削加工时主轴产生的热量最严重,主轴箱和传动箱内的齿轮机构间摩擦也发热,虽然通过浸油润滑和油路循环带走了部分热量,但是发热仍然很大^[1]。切削加工过程产生刀具和工件之间的摩擦和工件自身变形释放的热量也比较大,大量浇注切削液虽然带走了刀具和工件系统的外部热量,但大部分热量仍然留在加工系统^[2]。从上面的分析可以看出,加工过程中产生的热量必然引起刀具相对工件产生变形^[3]。为了找到机床的敏感热源点,需要对机床进行温度场分析。通常,温度场分析可以采用两种方法,一种是利用有限元方法,另一种是在机床上布置热传感器,通过连续的测温过程寻求,本文采用后一种方法^[4]。该系统温度传感器的布置如图1所示,其中6、7和8、9在立柱两侧各布置一套温度传感器,温度传感器共安装24套。

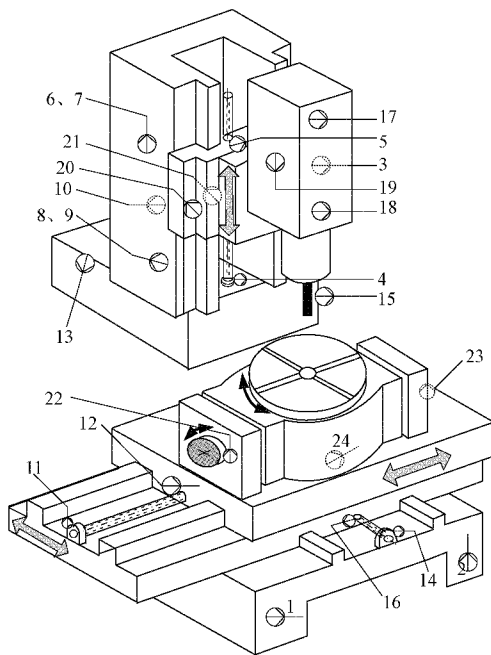


图1 温度传感器布置图

2 误差的测量方法

2.1 热误差的测量

直线误差运动分量包括两个部分,一部分是和位置相关的几何误差;另一部分是和温度相关的热误差,热误差的综合表达式如下。

$$\begin{cases} \delta_x(t) = \delta_{xz}(t) + \delta_{xs}(t) - \delta_{xy}(t) - \delta_{ex}(t) - \delta_{xA}(t) - \delta_{xL}(t) \\ \delta_y(t) = \delta_{yz}(t) + \delta_{ys}(t) - \delta_{yY}(t) - \delta_{yX}(t) - \delta_{yA}(t) - \delta_{yL}(t) \\ \delta_z(t) = \delta_{zZ}(t) + \delta_{zS}(t) - \delta_{zy}(t) - \delta_{zX}(t) - \delta_{zA}(t) - \delta_{zL}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\delta_x(t)$ 、 $\delta_y(t)$ 、 $\delta_z(t)$ 分别为刀具相对于工件在 x 、 y 、 z 方向上的热误差, t 为某时刻的温度。

由式(1)可知,刀具相对于工件在 x 、 y 、 z 方向上的热误差是各个运动副原点漂移误差的代数和,而且表达式仅

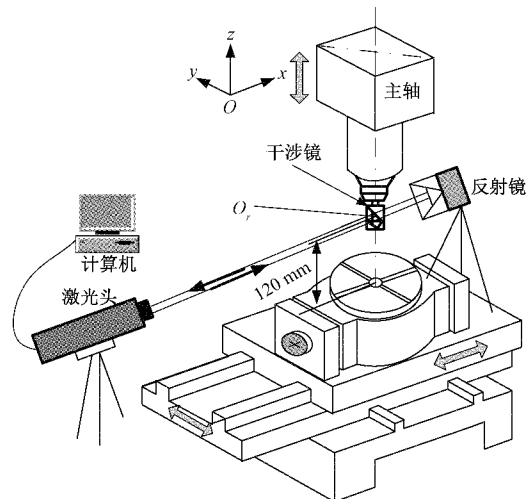
仅和温度有关。由此看出,可以不单独建立每一个热误差元素的预报模型,而是直接建立刀具相对于工件在 x 、 y 、 z 方向上热误差预报模型。这样节省了建模时间,使热误差模型变得相对比较简单,提高了模型的可靠性、实用性^[6]。

通过上面的分析可知,在进行热误差测量时,可以不单独测量五轴机床的单项误差元素,而直接测量机床刀架相对于工作台在3个方向上的热误差^[6]。

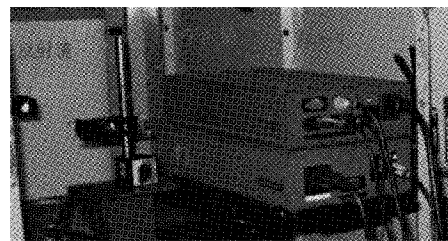
2.2 几何误差的测量

1) 测量坐标原点的选取

单项几何误差的测量由激光干涉仪来完成,通过不同光学器件间的组合,普通的激光干涉仪能够完成除滚转误差外的其它几何误差元素的测量^[7]。要想获得比较精确的几何误差测量结果,避免热变形对几何误差的影响,应该尽量使机床在冷态下完成测量任务^[8]。测量几何误差时,要安装的光学组件比较多,为了统一测量基准,减小测量误差,一般要建立测量基准点^[9],本文的测量基准点位于 C 向转轴轴线和工作台平面交点正上方,距离工作台平面120 mm,该点为干涉镜安装中心点,定位误差测量示意图如图2(a)所示,定位误差测量实物如图2(b)所示。



(a) 定位误差测量示意图



(b) 定位误差测量实物

图2 定位误差测量

2) 测量实施

测量时,各坐标轴测量范围均包括有效的全部行程, Z 轴有效行程为0~624 mm,每隔40 mm选取一个测量点,共有16个数据记录点; Y 轴有效行程为0~420 mm,每隔

26 mm 选取一个测量点,共有 15 个数据记录点;X 轴有效行程为 0~386 mm,每隔 27 mm 选取一个测量点,共有 13 个数据记录点。

3 实时补偿控制器

3.1 机床移动轴名义位移通讯接口系统

几何误差补偿要利用机床的直线位移信号,如何从机床获得需要的信号,关系到补偿的成败^[10]。当前的数控系统生产厂家基于自身利益考虑,没有开放数控系统与外界通讯的接口定义,因此,使得几何误差的补偿很难大面积推广。经过近多年的研究,针对采用 FANUC 0、SEIMENS 840D 数控系统部分型号的数控机床开发了接口板系统,把该接口板和数控系统单元建立通讯连接后,可以获得机床的 3 个线性位置信号,该信号被传递到补偿控制器^[11],经过补偿控制器的数据处理后输出几何误差补偿数据,运行中的接口板如图 3 所示。

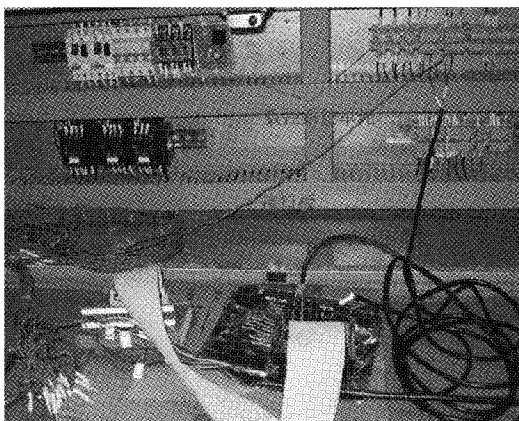


图 3 机床运动位移通讯接口系统

3.2 温度与热误差检测系统

本温度与热误差检测系统由主机、软件系统、输入输出接口、放大器、传感器等部分组成,补偿控制器的工作原理如图 4 所示。

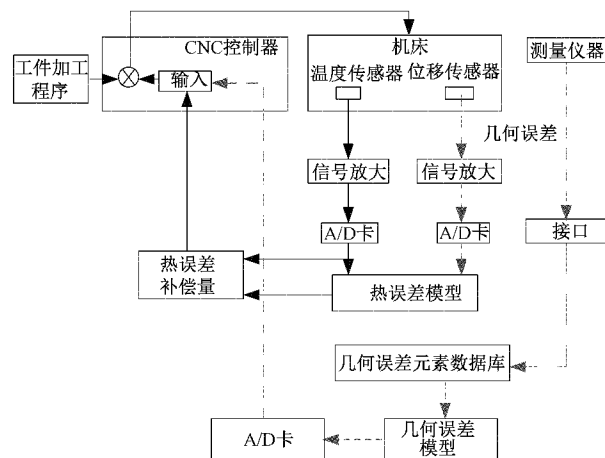


图 4 补偿控制器工作原理

误差补偿实施是移动刀具或工件使刀具和工件之间在机床空间误差的逆方向上产生一个大小与误差接近的相对运动而实现的,主要补偿步骤如下:

- 1) 利用开发的机床位移通讯接口系统建立补偿控制器与机床 CNC 系统通讯接口的连接^[12],从而能够使机床的位移信号实时传入补偿控制器;
- 2) 在已经确立的敏感热源点安装补偿用温度传感器,并通过温度采集系统建立温度传感器与补偿控制器的连接^[13],实现温度信号引入补偿控制器;
- 3) 补偿实验;
- 4) 补偿效果评价。

4 补偿实施与结果评价

补偿实施的流程如图 5 所示。

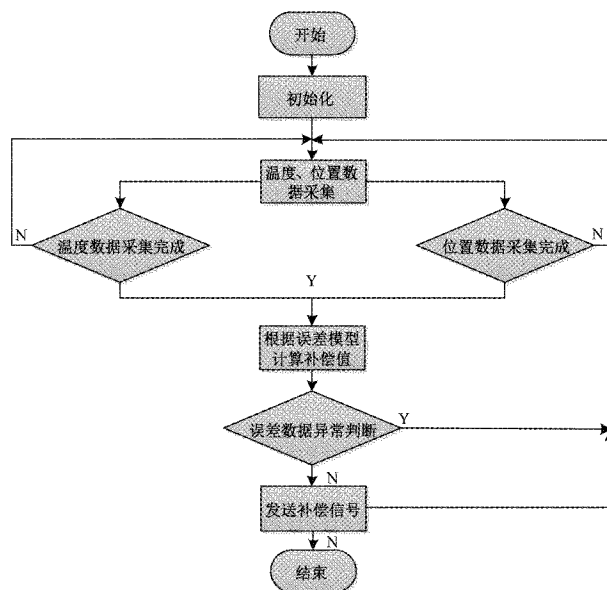


图 5 补偿实施流程

4.1 几何误差补偿结果评价

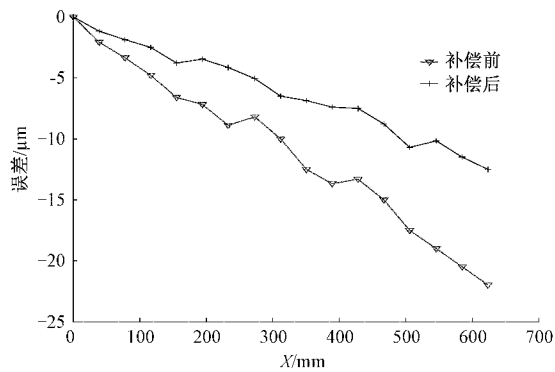
相对于热误差来讲,几何误差的测量比较困难,下面是采用激光干涉仪测量了 3 个定位误差来分析补偿前后的误差大小变化^[14]。

定位误差补偿前和补偿后的测量数据如图 6 所示,从图中可以看出在全行程上,补偿前 X 轴的平均定位误差为 13 μm ,补偿后平均定位误差为 8 μm ;补偿前 Y 轴的平均定位误差为 11 μm ,补偿后平均定位误差为 7 μm ;补偿前 Z 轴的平均定位误差为 10 μm ,补偿后平均定位误差为 6 μm ;由实验得知,补偿后最大偏差符合精度要求。

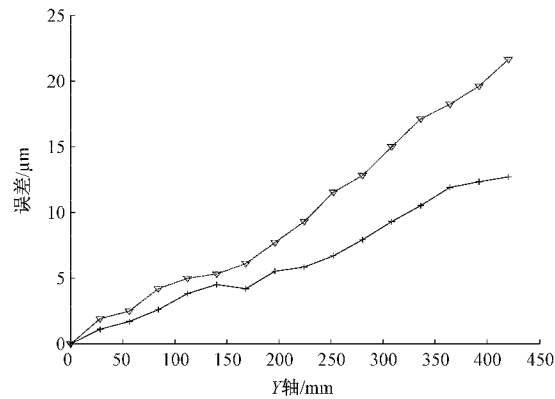
4.2 热误差补偿结果评价

在机床运行期间,利用热误差测量系统分别测量了补偿前和补偿后的 25 对数据来评价补偿的效果,相邻数据点间隔为 5 min。

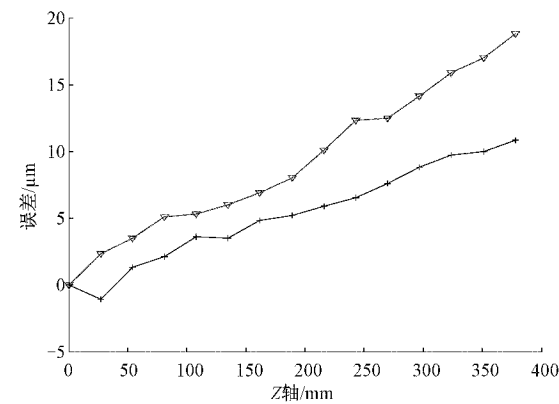
图 7 所示分别是空间 3 个方向补偿前后的误差测量结



(a) X轴定位误差补偿前后比较

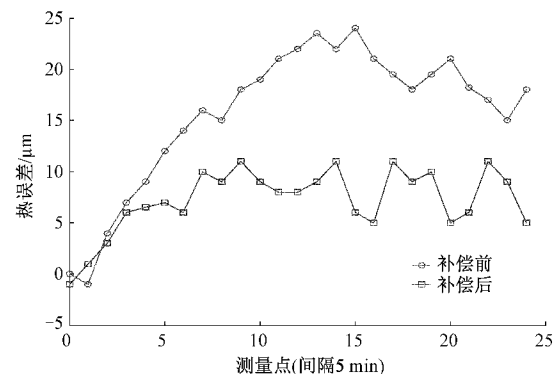


(b) Y轴定位误差补偿前后比较

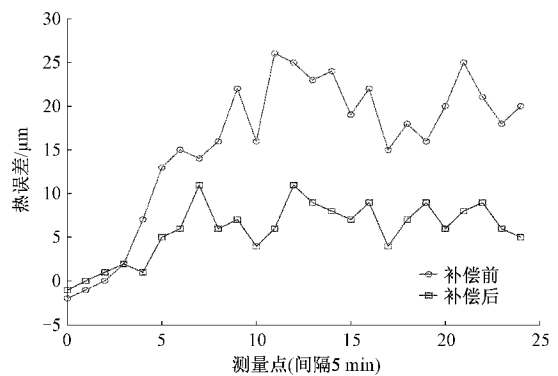


(c) Z轴定位误差补偿前后比较

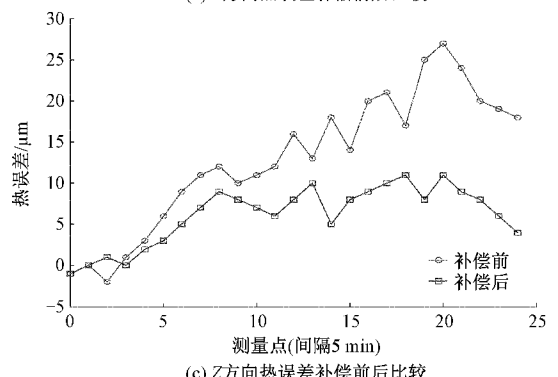
图 6 移动轴定位误差补偿前后比较



(a) X方向热误差补偿前后比较



(b) Y方向热误差补偿前后比较



(c) Z方向热误差补偿前后比较

图 7 X、Y 和 Z 方向补偿前后误差比较

果^[15]。对比 3 个坐标轴补偿前后热误差的测量数据可以看出补偿前后的热误差的变化,补偿前 X 方向平均误差为 20 μm ,补偿后为 10 μm ;补偿前 Y 方向平均热误差为 17 μm ,补偿后为 9 μm ;补偿前 Z 方向平均热误差为 19 μm ,补偿后为 9.5 μm ;测量实验证明实验曲线和模型输出曲线的吻合度比较好,说明补偿实验成功,补偿效果好。

5 结 论

采用该误差实时补偿控制器对双转台五轴机床实施几何和热误差联合补偿,利用其接口系统可以直接读取 CNC 系统寄存器中的位移信息,并把信号传输到补偿装置中,误差补偿控制器能够实现几何和热误差的联合补偿,补偿实验比较成功。该补偿系统只能对部分型号的数控机床和采用开放式数控系统的机床进行补偿。迫切需要补偿系统能得到进一步的改进,同时机床生产厂家也应该统一机床的外部通信接口,共同推进补偿研究的进步和完善,开发出新的具有经济性、智能性、通用性、方便性、柔性的误差检测和补偿系统。

参 考 文 献

- [1] 王秀山,李智广,王永田,等.垂直度误差对五轴数控机床误差建模精度和复杂度的影响[J].机械设计与制造,2015(11):171-173.
- [2] 刘阔,韩伟,王永青,等.数控机床进给轴热误差补偿技术研究综述[J].机械工程学报,2021,57(3):156-173.

- [3] 张林,陈国华,赵殿章,等.基于刀具偏转的机床主轴径向热误差的建模预测方法[J].制造技术与机床,2020(9):132-135.
- [4] 纪学军.数控机床热误差建模及补偿研究[J].制造技术与机床,2017(12):115-120.
- [5] 曹文智,孙名佳,于福来.数控机床空间误差测试及补偿技术研究[J].制造技术与机床,2018(8):118-121.
- [6] 杨建国,范开国.数控机床主轴热变形伪滞后研究及主轴热漂移在机实时补偿[J].机械工程学报,2013,49(23):129-135.
- [7] 田宇,高强,李栋,等.测距传感器性能评估与故障诊断方法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(10):172-178.
- [8] 刘璞,凌杜,正春,等.基于工件尺寸的数控机床热误差建模与补偿[J].机械设计与研究,2020,36(5):122-125,131.
- [9] 何怡,刚陈,张辉,等.改进AFSA-BP神经网络的湿度传感器温度补偿研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(7):95-100.
- [10] 王维,杨建国,姚晓栋,等.数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿[J].机械工程学报,2012,48(7):171-177.
- [11] 李翠玲,王耿华,杨强,等.五轴机床机构运动精度的可靠性分析[J].机械设计与制造,2013(1):201-202,206.
- [12] 项四通,杜正春,杨建国.数控机床几何与热误差测量和建模研究新进展[J].机械设计与研究,2019,35(6):52-57.
- [13] 侯洪福,葛广言,杜正春,等.铣削加工力-位误差的综合建模与补偿[J].机械设计与研究,2018,34(6):109-114.
- [14] 杨建国.智能型数控机床多误差动态实时补偿系统及其应用[J].世界制造技术与装备市场,2013(2):112-114.
- [15] 赵飞,梅雪松,李光东,等.数控成型磨齿机加工误差在线监测及补偿[J].机械工程学报,2013,49(1):171-177.

作者简介

岳玉霞,高级讲师,主要研究方向为机电设备的设计、安装调试与维修。

E-mail:yueyuxia@126.com

王秀山,博士,教授,主要研究方向为数控机床超精密检测和工业机器人设计等。

E-mail:towxs@163.com

李利军,硕士,正高级讲师,主要研究方向为控制工程。

E-mail:lilijun0616@126.com